

KURUCZ ZOLTÁN

# ÖSSZEFONÓDÁSON ALAPULÓ KVANTUMKOMMUNIKÁCIÓS SÉMÁK

Doktori (Ph.D.) értekezés tézisei

Készült a Magyar Tudományos Akadémia  
Szilárdtestfizikai és Optikai  
Kutatóintézetében Budapesten

Témavezető  
JANSZKY JÓZSEF  
az MTA levelező tagja



Szegedi Tudományegyetem  
Szeged, 2007

Az információ fogalma szorosan összefügg az azt feldolgozó fizikai rendszerrel. Ha ez utóbbi a kvantummechanika törvényeit követi, a kvantuminformáció elméletét kell alkalmazni. Az értekezés olyan kommunikációs eljárásokat tárgyal, amikben a kvantuminformáció egy tisztán klasszikus és egy nemklasszikus (összefonódott) csatornán megosztva továbbítódik. A kvantumteleportáción kívül az általánosabb távoli állapot-előállítási sémák és tulajdonságaik is bemutatásra kerülnek. Ez az összefoglaló az értekezés főbb eredményeit mutatja be.

## Bevezetés

A legegyszerűbb kvantumrendszereknek két, egymástól jól megkülönböztethető állapota van, amit szokás az egymásra merőleges  $|0\rangle$  és  $|1\rangle$  vektorral jelölni. Ezeket az információelméleti szempontból egymással egyenértékű rendszereket nevezik *kvantumbit*nek. Míg a klasszikus bit vagy a „0”, vagy az „1” értéket veheti fel, a kvantumbit értéke egyszerre lehet mindkettő: a kvantumbit lehetséges tiszta állapotait a  $|0\rangle$  és az  $|1\rangle$  állapot komplex számokkal kifejezett *szuperpozíciói* alkotják, azaz  $|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$ , ahol  $\theta$  és  $\varphi$  két valós szögparaméter, amely egy fiktív térbeli irányt határoz meg. Ez a kettős természet a veleje számos kvantuminformatikai jelenségnek. Ez húzódik meg egyes kvantumalgoritmusok figyelemreméltó hatékonysága mögött: egy függvény párhuzamosan, egyszerre több pontban értékelhető ki, ha a bemenet szuperponált állapotban van [1]. Híres példa erre Shor prímtényezőző felbontást végző kvantumalgoritmus [2], amely exponenciálisan gyorsabb a jelenleg ismert klasszikus algoritmusoknál. A fizikai rendszerek kvantumos természete azonban meglehetősen érzékeny a környezeti behatásokkal szemben, pusztán megfigyelésük is kihat kvantumos tulajdonságaikra. Mérés során a kvantumbit állapota óhatatlanul megváltozik, és az eredeti, két valós szögparaméterrel jellemezhető kvantumállapotról csupán egyetlen bitnyi információ nyerhető ki: a mérés a kvantuminformációt klasszikussá alakítja. Ezért a teljes kvantuminformáció mindig rejtve marad, azt másolni (klónozni) nem lehet [3]. Ez az alapja az elvileg feltörhetetlen kvantumtitkosításnak is [2].

A legérdekesebb fizikai jelenségek mégis az *összefonódáson* alapulnak: amikor a szuperpozíció elve több, térben szétválasztott részrendszer esetében érvényesül. Példaként tekintsünk két megkülönböztethető, feles spinű elemi részecskét, aminek összspinje nulla. E két részecske egy-egy kvantumbitnek tekinthető, ha hullámfüggvényüknek csak a spinre vonatkozó részét vesszük figyelembe. A két kvantumbit a szinglett spinállapotban van, amely a következő tulajdonsággal bír. Ha egy az első részecskén elvégzett mérés során úgy találjuk, hogy annak spinje egy adott (de véletlenszerű) irányba mutat, akkor a másik részecske spinje bizonyossággal az ellentétes irányba mutat. Ilyenkor azt mondjuk, hogy a két kvantumbit össze van fonódva. E jelenség fontosságára Einstein, Podolsky és Rosen [4] hívta fel először a figyelmet a kvantumelmélet teljességének és lokalitásának ellentmondása kapcsán. Később Bell [5], majd Clauser és munkatársai [6] mutatták meg, hogy az összefonódás olyan korrelációkat eredményez a mérési statisztikákban, amely lokális klasszikus elméletekkel nem magyarázható. Azóta az összefonódás kulcsfontosságú szerepet kapott a kvantuminformatikában. Ha ugyanis rendelkezésre állnak összefonódott állapotok, segítségükkel olyan nemlokális feladatok is elvégezhetővé válnak, amelyeket pusztán lokális műveletekkel és klasszikus kommunikációval nem lehetene megoldani. Az összefonódás tehát egy olyan erőforrás, amellyel áthághatók a lokális szabályok [7].

Számos alkalmazása közül az egyik legfontosabb a *kvantumteleportáció* [8]. E kvantumkommunikációs protokoll alapján a kvantuminformáció úgy továbbítható egyik helyről egy másikra, hogy az azt reprezentáló kvantumrendszerek helyben maradnak, rajtuk minden művelet lokális, és a két kommunikáló fél között csak klasszikus adatátvitel történik. Egy kvantumbit teleportációjához ideális esetben egy teljesen összefonódott pár szükséges, mint például a korábban említett szinglett állapot. Ennek összefonódás-tartalma definíció szerint 1 ebit [9]. Ennél kevesebb erőforrással, így például egy részlegesen összefonódott vagy akár kevert állapotú párral is elvégezhető a teleportáció [10], ám ilyenkor az átvihető kvantuminformáció mennyisége (a csatorna kapacitása) lecsökken. Az ilyen nemideális sémák általában csak bizonyos valószínűséggel hajthatók végre (probabilisztikusak), vagy pedig torzítanak, ami átviteli hibákhoz vezethet. *Reverzibilis* csatornák esetében a torzítás ugyan visszafordítható, de az ilyen sémák

szükségszerűen probablisztikusak, ha nem teljesen összefonódott erőforrást használunk [11]. Fontos kérdés, hogy egy adott, valóságos, nemideális erőforrás esetén hogyan lehet reverzibilissé tenni egy csatornát, illetve hogyan lehet torzításmentes (de persze probablisztikus) teleportációs protokollt tervezni [A, B]. Részben ezzel a kérdéssel is foglalkozik az értekezés.

Egy tetszőleges állapotú kvantumbit teleportációjához az összefonódáson felül még 2 bitnyi klasszikus információ továbbítása is szükséges. Az ideális teleportáció erőforrásigénye tehát 1 ebit összefonódás és 2 bit klasszikus kommunikáció kvantumbitenként, és semelyik másik kvantumkommunikációs protokoll sem képes egy ismeretlen kvantumállapot torzításmentes továbbítására ennél „olcsóbban” [12]. Ha azonban a küldő fél ismeri a kvantumbitet megadó két valós szögparamétert, akkor az előbbi két erőforrás közül az egyik megspórolható a másik rovására. Az ilyen protokollokat *távoli állapot-előállításnak* hívják. Például összefonódás nélkül is megvalósítható a kvantumkommunikáció, ha a küldő az állapotot teljesen leíró két valós szögparamétert továbbítja, ami végtelen sok bitnyi klasszikus információt jelent. 1 ebitnél kevesebb összefonódás szükséges akkor, ha a küldő csak véges sok bitnyi információt közöl az állapotról [13]. Másrészt viszont kvantumbitenként 1 bit is elegendő, ám ez az összefonódott erőforrás pazarlását vonja maga után [14].

A kvantumkommunikáció erőforrásigénye az előállítható állapotok halmazának megszorításával is csökkenthető. Ha a résztvevő felek előre megegyeznek, hogy csak olyan állapotot állítanak elő, amely a Bloch-gömb egyenlítőjén fekszik (tehát a feles spinű részecske spinje a  $z$  irányra merőlegesen polarizált), akkor elegendő 1 ebitnyi összefonódás és 1 bit klasszikus kommunikációja [15]. A módszer lényege a szinglett spinállapot azon tulajdonságán alapul, hogy ha megmérjük a pár egyik felének valamilyen irányú spinkomponensét, akkor a pár másik felének spinje is az adott irányban lesz polarizált: a mérés eredményétől függően vagy ugyanabba az irányba, vagy az azzal ellentétes irányba fog mutatni. Ha tehát a küldő az  $|\vec{n}\rangle$  állapotot ( $\vec{n}$  irányvektorral jellemzett spinállapot) szeretné a távolban előállítani, nincs más dolga, mint megmérni az összefonódott szinglett nála levő része spinjének  $\vec{n}$  irányú vetületét. Ha az eredmény  $-\frac{1}{2}$ , akkor a fogadó félnél lévő rész állapota helyesen  $|\vec{n}\rangle$ , míg  $+\frac{1}{2}$  esetén ez éppen  $|\neg\vec{n}\rangle$ , ami a Bloch-gömb átellenes pontjának felel meg. Ezután a küldő elküld a

fogadónak 1 bit információt: a mérés eredményét. Az első esetben nincs további teendő, míg a másodikban a fogadónak egy középpontos tükrözést kell elvégeznie, hogy megkapja a helyes  $|\vec{n}\rangle$  állapotot. Ez a tükrözés, amely egy kvantumbit tetszőleges tiszta állapotát a rá ortogonális állapotba képezi ( $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \mapsto \beta^*|0\rangle - \alpha^*|1\rangle$ ), egy antiunitér transzformáció, mint az időtükrözés, s ezért fizikailag nem végezhető el. Ha azonban tudjuk, hogy az állapot a Bloch-gömb egyenlítőjén fekszik, azaz  $|\phi\rangle = (|0\rangle + e^{i\varphi}|1\rangle)/\sqrt{2}$ , akkor a középpontos tükrözés helyettesíthető a  $z$  tengely körüli  $180^\circ$ -os forgatással, ami már egy fizikailag megvalósítható unitér transzformáció. Ez az „egyenlítői módszer” általánosítható kvantumbitről több dimenziós rendszerekre is [16]. Ekkor a számítási bázis egyenlően súlyozott szuperpozíciói állíthatók elő. Ezek egy  $D - 1$  dimenziós valós sokaságot alkotnak a  $D$  komplex dimenziós állapottérben, és a távoli előállításukhoz szükséges erőforrás mértéke  $\log_2 D$  ebit és ugyanennyi bit [C]. A módszer kiterjeszthező végtelen dimenziós állapotterekre is [E].

Fontos kérdés a kvantumkommunikációval kapcsolatban, hogy a klasszikus üzenetből mennyi információhoz lehet hozzájutni az átvitt kvantumállapotról, illetve hogy a fogadó (esetleg egy harmadik fél) hozzáférhet-e további részinformációhoz azon felül, ami a kimeneti kvantumállapot egyetlen példányából nyerhető ki. Ha például távoli állapot-előállítás vagy nem-ideális teleportáció esetén a klasszikus üzenet valószínűségeloszlása függ a továbbítandó állapottól, akkor abból leszűrhető bizonyos mértékű információ a bemenetről. Teleportáció esetében, ahol a bemeneti állapot ismeretlen, a klónozhatatlanság miatt ez a kimenetben információvesztést, zajt eredményez [11]. Zajmentes teleportáció ezért csak úgy valósítható meg, ha a klasszikus üzenet nem tartalmaz információt a bemenetről [A]. Ha viszont információ nem szivároghat ki, a kommunikációs protokoll biztonságosan használható például titkosításra vagy alkalmazható különféle kvantumszámítások során [17]. Az ilyen átvitelt *feledékenynek* (angolul *oblivious*) hívják. Megmutatható [18], hogy tetszőleges állapot távoli előállítására alkalmas feledékeny sémák erőforrásigénye legalább 1 ebit és 2 bit kvantumbitenként, és egyik sem csökkenthető a másik rovására. Az ilyen sémák tehát kitüntetett szerepet játszanak a kvantuminformatikában. Joggal merül fel a kérdés, hogy mitől lesz egy összefonódáson alapuló kvantumkommunikációs séma feledékeny, illetve hogyan kell megkonstruálni távoli állapot-

előállítási sémákat, hogy azok ilyenek legyenek. Az értekezés egyik fő eredménye [F] erre ad választ.

A kvantumteleportáció sémáját már kiterjesztették folytonos változós kvantumrendszerekre is [19]. Ilyen rendszer például az elektromágneses tér egy kiszemelt módusa vagy egy tömeggel rendelkező, spin nélküli, egy dimenzióban mozgó elemi részecske. Ez utóbbi esetben a rendszert leíró folytonos változó lehet a koordináta és az impulzus, de lehet a kanonikus hatás és szögváltozó is. Mivel e változók spektruma eltérő jellegű, a folytonos változós teleportációs protokollok alapvetően különbözők lehetnek. Példa erre az elektromágneses tér kvadratúráin [20], illetve a fotonszámokon és fázison [21] alapuló teleportációs sémák. A folytonos kvantuminformáció alkalmazása egy érdekes és sok szempontból gazdagabb alternatíváját kínálja a „hagyományos”, kvantumbit alapú kvantuminformatikának [22, 23]. Ezért fontos a folytonos változós kvantumkommunikáció tanulmányozása. Bár ismert néhány probabilisztikus folytonos változós távoli állapot-előállítási módszer, amely két összefonódott fénynyaláb egyikén elvégzett feltételes mérésen alapul, a távoli állapot-előállítás elmélete mindezekig hiányos volt [F]. Az értekezés másik fő eredménye ezt az űrt próbálja mérsékelni.

## Célkitűzések

A kitűzött kutatási feladatok egyike volt megvizsgálni, hogy részlegesen összefonódott erőforrás tisztítás nélkül közvetlenül is alkalmas-e torzításmentes állapotátvitelre, illetve hogy miként lehet adott részlegesen összefonódott állapothoz teleportációs protokollt tervezni. Mivel a kvantumkommunikáció egy klasszikus és egy nemklasszikus csatornán megosztva történik, felmerül a kérdés, hogy a két csatorna milyen arányban vesz részt az információ továbbításában, felállítható-e valamilyen mérleg az átvitt és a kiszivárgott információ mennyiségére. Ebből a szempontból kitüntetett szerepet játszanak a feledékeny távoli állapot-előállítási sémák. Meghatározandó volt ezért egy feltétel, hogy mikor feledékeny egy séma.

Az egyenlítői állapotok távoli előállításának módszere determinisztikus és torzításmentes, de az előállítható állapotok halmaza korlátozott. Vizsgálat tárgya volt, hogy milyen más típusú állapotok állíthatók elő az egyenlítői állapotokon kívül, és hogyan lehet más jellegű sémákat tervezni. Ki

lehet-e bővíteni az előállítható állapotok halmazát, ha a fogadó fél nemcsak unitér transzformációt hajthat végre, hanem a nemfizikai (antiunitér) transzformációk is megengedettek? Végül kiterjeszthető-e a séma folytonos változós kvantumrendszerekre?

## Vizsgálati módszerek

Az értekezésben vizsgált távoli állapot-előállítási sémák mint kétrésztvevős kvantumkommunikációs protokollok az alábbi modell szerint aknázzák ki az összefonódásban jelen lévő nemklasszikus korrelációt a kvantuminformáció továbbítása érdekében. Először is feltételezzük, hogy a kommunikáció megkezdése előtt már adott két, összefonódott állapotban lévő kvantumrendszer, egyik (az  $A$  rendszer) a küldőnél, a másik (a  $B$  rendszer) a fogadó félnél. A protokoll első lépéseként a küldő elvégez egy mérést az  $A$  rendszeren. A kvantumteleportáció esetében ez a mérés egy úgynevezett Bell-mérés, amely az ismeretlen állapotú bemeneti kvantumrendszert és az  $A$  rendszert egy összefonódott állapotra vetíti. Az egyenlítői módszernél nincs bemeneti kvantumrendszer, a küldő számára teljesen ismert a távolban előállítandó állapot. Ezért csak az  $A$  rendszeren történik egy projektív mérés, de itt a mérés sajátállapotai közvetlenül függnak az előállítani kívánt állapottól. Az  $AB$  rendszer összefonódottsága e mérés hatására megszűnik, ám az eredetileg benne rejlő korreláció miatt a mérés eredménye nem független a  $B$  rendszer állapotától. A második lépésben a küldő egy klasszikus üzenetet küld a fogadó félnek. Az üzenet függ a mérés kimenetelétől, és általános esetben függhet a továbbítani kívánt kvantuminformációtól is. A protokoll harmadik lépéseként a fogadó fél egy lokális kvantumműveletet hajt végre a  $B$  rendszeren, amit egy adott, előre rögzített készletből a klasszikus üzenet alapján választ ki. A fenti két példában ez egy unitér transzformáció. A művelet végén a  $B$  rendszer állapota többé nem függ a mérés kimenetelétől, hanem az eredeti kvantuminformációt tartalmazza. Fontos, hogy e kvantuminformáció mindaddig rejtve marad, amíg a klasszikus üzenet meg nem érkezik a fogadó félhez. Ezért a kvantumkommunikáció nem gyorsabb klasszikus megfelelőjénél, a kauzalitást nem sérti.

Az értekezés számos eredménye a kétrészesekes összefonódott állapotok *antilineáris* operátorokkal való ábrázolásán alapszik. Bár az antilineáris

(vagy más néven konjugált lineáris) operátorok szerepe a kvantummechanikában leggyakrabban az időtükrözési szimmetriával kapcsolatban szokott felmerülni, a kvantuminformáció-elmélet is kínál néhány érdekes alkalmazást. Legyen az  $AB$  rendszer a  $|\Psi\rangle_{AB}$  tiszta összefonódott állapotban. Ha az  $A$  részrendszeren elvégzett teljes mérés eredményeként e részrendszer a  $|\phi\rangle_A$  állapotba kerül, akkor a korreláció miatt a  $B$  részrendszer állapota is teljes bizonyossággal megmondható:  $|\psi\rangle_B = \lambda_A \langle\phi|\Psi\rangle_{AB}$ . Mivel e részleges skalárszorzat konjugált lineáris az első tényezőjében, az

$$\hat{A}_\Psi: \mathcal{H}_A \rightarrow \mathcal{H}_B, |\phi\rangle_A \mapsto {}_A\langle\phi|\Psi\rangle_{AB}$$

leképezés egy antilineáris operátort definiál. Ez az operátor teljesen és egyértelműen leírja a kétrészecskés állapotot. Az általánosabb, kevert állapotokat is figyelembe vevő elmélet szerint a kétrészecskés állapotok úgynevezett *teljesen \*-kopozitív* szuperoperátorokkal jellemezhetők. Az ilyen szuperoperátorok Kraus-felbontásában antilineáris  $\hat{A}_i$  operátorok szerepelnek:  $\hat{M} \mapsto \sum_i \hat{A}_i \hat{M} \hat{A}_i^\dagger$ . Ez a reprezentáció kiválóan alkalmas az összefonódáson alapuló kvantuminformatikai sémák leírására és elméleti számolására, mivel az állapottranszformációk egyszerűen kaphatók a megfelelő antilineáris operátorok kompozícióiként.

## Az eredmények tézisszerű összefoglalása

1. A nemideális teleportáció véges dimenziós Hilbert-terekben való leírására egy olyan módszert alkalmaztam, amely az összefonódott állapotokat antilineáris operátorokkal reprezentálja. Rámutattam, hogy a teleportációs csatornát leíró állapottranszformáció egyszerűen megkapható az összefonódott erőforrást és a csatolt mérést megadó két antilineáris operátor kompozíciójaként. Megmutattam, hogy a probabilisztikus teleportációs csatorna akkor és csak akkor fordítható vissza lineáris transzformációval, ha a sikeres mérési kimenet(ek) valószínűsége nem függ a bemeneti állapottól, azaz a folyamat feledékeny. Ebben az esetben a csatorna unitér transzformációval fordítható vissza, és így torzításmentes probabilisztikus teleportációként használható.



Egy adott tiszta, de részlegesen összefonódott erőforrás mellett megadtam egy összefonódás-illesztési feltételt, amit a mérésnek teljesítenie kell ahhoz, hogy a csatorna reverzibilis legyen. [A, B]

2. Vizsgáltam a feledékeny kvantumkommunikáció kérdését. Megadtam egy általános feltételét annak, hogy egy torzításmentes távoli állapot-előállítási séma feledékeny legyen: ehhez szükséges és elégséges, hogy a küldő általánosított (POVM) mérését jellemző pozitív operátorok, amik ugyanis az előállítandó állapottól függnék, teljesen \*-kopozitívak legyenek. Ez antilineáris analógja az állapottranszformációknál szokásos teljesen pozitív tulajdonságnak. A tiszta állapotokon alapuló sémáknál ez a feltétel azt jelenti, hogy a mérés sajátállapotai antilineáris függvényei a célállapotnak. [F]
3. Az antilineáris formalizmust azokra a torzításmentes determinisztikus távoli állapot-előállítási sémákra is alkalmaztam, amelyekben a visszaállító transzformáció unitér [C]. Alternatív, egyszerűen alkalmazható feltételt adtam felcserélési reláció formájában arra, hogy az ilyen sémák létezzenek, illetve feledékenyek legyenek. Módszert dolgoztam ki arra, hogyan lehet több dimenziós állapottérben protokollt tervezni kevesebb dimenziós protokollok kombinálásával [F].
4. Megmutattam, hogy egy egyrészeckés pozitív operátor értékű mérés (POVM), amelynek pozitív operátorai egy általános (nem megszorított) ismeretlen állapottól függnék, és teljesen \*-kopozitívak, mindig visszavezethető egy olyan kétrészeckés mérésre, amit a szóbanforgó rendszeren és egy az ismeretlen állapotba preparált segédrendszeren kell elvégezni. Ha azonban az ismeretlen állapot nem tetszőleges, például a Bloch-gömb egyenlítőjén fekszik, akkor a mérés ilyen módon nem vezethető vissza. Következésképpen az egyenlítői állapotok távoli előállításánál szükséges, hogy a küldő teljesen ismerje a célállapotot, és nem elegendő, ha a kvantuminformáció csupán egyetlen példányban áll a küldő rendelkezésére.
5. Megmutattam, hogy az egyenlítői módszer nem terjeszthető ki determinisztikus és torzításmentes módon tetszőleges, megszorítatlan állapotra kvantumbitenként 1 ebit összefonódás és 1 bit klasszikus kommunikáció felhasználása mellett. Kettőnél több dimenziós állapotterű

rendszerekben az előállítható állapotok halmaza még akkor sem terjeszthető ki a teljes állapotterre, ha a fogadó a helyreállító transzformációt nem a számára ismeretlen kimeneti állapoton, hanem a később elvégzendő ismert műveleteken hajtja végre. Ez utóbbi esetben minden mérés statisztikája helyesen reprodukálható lenne. [D]

6. Az egyenlítői állapotok távoli előállítási sémáját általánosítottam folytonos változós kvantumrendszerekre. A dinamikai változók spektruma alapján három esetet különítettem el impluzus-, részecskeszám- és fázisreprezentációban. Megmutattam, hogy az előállítható állapotok halmaza (folytonosan, illetve megszámlálhatóan) végtelen sok valós szögparaméterrel paraméterezhető, miközben a klasszikus üzenet csupán egyetlen valós szám, illetve egy felülről nem korlátos egész szám [E, G].

## Hivatkozások

- [1] D. Deutsch, *Proc. R. Soc. Lond. A* **400**, 97–117 (1985).
- [2] M. A. Nielsen és I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information* (Cambridge University Press, Cambridge, 2000).
- [3] W. K. Wootters és W. H. Zurek, *Nature* **299**, 802–803 (1982).
- [4] A. Einstein, B. Podolsky és N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777–780 (1935).
- [5] J. S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).
- [6] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony és R. A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880–844 (1969).
- [7] S. D. Bartlett, T. Rudolph és R. W. Spekkens, (2006). quant-ph/0610030.
- [8] C. H. Bennett, G. Brassard, C. Crépeau, R. Jozsa, A. Peres és W. K. Wootters, *Phys. Rev. Lett.* **70**, 1895–1999 (1993).
- [9] H. K. Lo és S. Popescu, *Phys. Rev. Lett.* **83**, 1459–1462 (1999). quant-ph/9902045.
- [10] S. Popescu, *Phys. Rev. Lett.* **72**, 797–799 (1994).
- [11] M. A. Nielsen és C. M. Caves, *Phys. Rev. A* **55**, 2547–2556 (1997). quant-ph/9608001.
- [12] H. K. Lo, *Phys. Rev. A* **62**, 012313 (2000). quant-ph/9912009.
- [13] I. Devetak és T. Berger, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 197901 (2001). quant-ph/0102123.
- [14] C. H. Bennett, P. Hayden, D. W. Leung, P. W. Shor és A. Winter, *IEEE Trans. Inform. Theory* **51**, 56–74 (2005). quant-ph/0307100.
- [15] A. K. Pati, *Phys. Rev. A* **63**, 014302 (2000). quant-ph/9907022.
- [16] M.-Y. Ye, Y.-S. Zhang és G.-C. Guo, *Phys. Rev. A* **69**, 022310 (2004). quant-ph/0307027.
- [17] D. Gottesman és I. L. Chuang, *Nature* **402**, 390–393 (1999).
- [18] D. W. Leung és P. W. Shor, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 127905 (2003). quant-ph/0201008.
- [19] L. Vaidman, *Phys. Rev. A* **49**, 1473–1476 (1994).
- [20] S. L. Braunstein és H. J. Kimble, *Phys. Rev. Lett.* **80**, 869–872 (1998).
- [21] G. J. Milburn és S. L. Braunstein, *Phys. Rev. A* **60**, 937–942 (1999). quant-ph/9812018.
- [22] S. Lloyd és S. L. Braunstein, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1784–1787 (1999). quant-ph/9810082.
- [23] D. Gottesman, A. Kitaev és J. Preskill, *Phys. Rev. A* **64**, 012310 (2001). quant-ph/0008040.

## A tézispontokhoz kapcsolódó közlemények

- [A] Kurucz Z., Koniorczyk M. és Janszky J.: Quantum teleportation with partially entangled states. *Fortschr. Phys.* **49**, 1019–1025 (2001). quant-ph/0308020.
- [B] Kurucz Z., Koniorczyk M., Adam P. és Janszky J.: An operator description of entanglement matching in quantum teleportation. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* **5**, S627–S632 (2003).
- [C] Kurucz Z. és Adam P.: Preparable ensembles for remote state preparation. *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* **7**, 135–138 (2005).
- [D] Kurucz Z., Adam P. és Janszky J.: Simulating measurement statistics in remote state preparation. *Acta Phys. Hung. B: Quant. El.* **23**, 49–54 (2005).
- [E] Kurucz Z., Adam P., Kis Z. és Janszky J.: Continuous variable remote state preparation. *Phys. Rev. A* **72**, 052315 (2005). quant-ph/0510074.
- [F] Kurucz Z., Adam P. és Janszky J.: General criterion for oblivious remote state preparation. *Phys. Rev. A* **73**, 062301 (2006). quant-ph/0605057.
- [G] Kurucz Z., Adam P. és Janszky J.: Remote state preparation in quadrature basis. *Acta Phys. Hung. B: Quant. El.* **26**, 319–326 (2006).

## A jelölt további közleményei

- [H] Koniorczyk M., Kurucz Z., Gábris A. és Janszky J.: General optical state truncation and its teleportation. *Phys. Rev. A* **62**, 013802 (2000).
- [I] Farkas S., Kurucz Z. és Weiner M.: Poincaré covariance of relativistic quantum position. *Int. J. Theor. Phys.* **41**, 79–88 (2002). quant-ph/0009102.